

# 재난환경내 건축재료 및 연기에 따른 드론 전파 감쇠에 대한 연구

김태동, 염인수\*  
국립소방연구원 대응기술연구실

## Study on Microwave Attenuation of Drone according to Building material and Smoke in disaster environment

Tae-Dong Kim, In-Su Yeom\*

Researcher, Department of Resilience Enhancement Technology, National Fire Research Institute of Korea

**요약** 재난환경에서 연기와 건축물재료에 따른 전파 감쇠에 관한 실험적 연구를 제시하였다. 화재와 같은 재난환경이 발생하면 드론 운용시 건축자재에 의한 통신장애나 화재 시 발생하는 연기로 인해 전파 감쇠가 발생한다. 이에 따라 본 논문에서는 벽체와 연기에 따른 드론의 전파 특성을 비교·분석하였다. 먼저 벽체 종류 및 두께에 따른 전파 감쇠를 분석하기 위해 완전 차폐 공간인 무향실(3m x 1m x 1m)에서 4가지 벽체에 해당하는 전파 특성을 실험하였다. 또한 연기밀도에 따른 전파 특성 시험을 위해 컨테이너 공간(5.8m x 2.8m x 2.2m)을 구성하였고 광 소멸법을 이용하여 공간내 동일한 연기밀도를 구성한 후 4종류의 연기에 대한 전파감쇠를 비교하였다. 본 연구에서는 실험에 사용될 픽스호크 기반의 모듈을 제작하고 비행관제용 433MHz, 제어용 2.4GHz, 그리고 영상수신용 5GHz 대역에서 전파 감쇠에 관한 연구를 수행하였다. 벽체 종류 및 두께에 따라 수신감도가 크게 감소하여 감쇠의 주요 원인이 되었다. 연기에 의한 전파 감쇠는 크지 않지만, 우레탄, 플라스틱, 고무 등의 연료는 목재에 비해 상대적으로 감소하였으며, 2.4GHz와 영상수신용 5GHz대역에서는 감소폭이 상대적으로 크게 나타났다.

**Abstract** This study examined microwave attenuation according to the smoke and wall type in a disaster environment. When a disaster such as a fire occurs, there is a distortion of drone communication within the building. An experimental study was performed to compare the microwave attenuation of drones according to the building materials and smoke. First, the microwave characteristics corresponding to the four types of walls in a specially designed anechoic chamber (3m x 1m x 1m) were examined to determine the microwave attenuation for building materials. The propagation attenuation was studied according to the four types of smoke with the same density in the container space (5.8m x 2.8m x 2.2m). In this study, a communication module based on Pixhawk was designed and was conducted on microwave attenuation in 433MHz for mission mode, 2.4GHz for remote controller control, and 5GHz for image receiving. The microwaves were not transmitted and decreased significantly depending on building materials at the radio frequency, which is the leading cause of attenuation. Although microwave attenuation was not huge according to the fuels in smoke, fuel like urethane, plastic, and rubber have a relatively reduced compared to wood. In the 2.4GHz and 5GHz bands, the decrease in microwave energy was relatively large.

**Keywords** : Building Materials, Microwave Attenuation, Smoke, Drone, Disaster Environment

This research was supported by the Technology and Development to Support Firefighting Activities(1761002660) founded by National Fire Agency.

\*Corresponding Author : In-Su Yeom(National Fire Research Institute of Korea.)

email: insu81@korea.kr

Received October 18, 2022

Revised November 16, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

## 1. 서론

최근 드론은 각종 첨단기술을 접목하여 재난, 교통, 농업, 건설 등 다양한 공공분야에서 업무에 활용되고 있다. 카메라 장비를 부착하여 높은 위치에서 넓은 면적을 검색할 수 있고, 지상에서 확인 불가능한 정보를 파악하여 신속하게 제공해 주는 장점이 있다. 이러한 장점을 활용하여 소방현장에서 드론은 산악 등 광범위한 현장을 사각 없이 수색할 수 있고, 화재대응 현장에서는 연소확대 추이 등 현장상황을 영상으로 송출하여 지휘 판단에 도움이 되는 모니터링 업무에 집중적으로 활용되고 있다. 최근 광주 붕괴 사고나 대형 산업 공장 화재 등 재난은 갈수록 다양해지고 복잡해지는 양상이며, 예측할 수 없는 소방현장으로 인해 대원의 순직사고 등이 빈번하게 발생된다. 이러한 희생을 줄이기 위해 소방력 투입 전 소형 드론의 건물 내부로 선제 진입에 의한 정보수집 수행이 요구된다. 그러나 드론의 건물 내부 탐색 시 주변 벽체 및 기타 간섭요소로 인해 전파가 감쇠되며, 조종 신호 및 영상 데이터를 송·수신하는 과정에서 큰 손실이 발생할 수 있다. 내부 탐색으로 주로 활용되는 상용드론의 통신은 Industrial Scientific and Medical (ISM) (2.4~2.48GHz, 5.725~5.875GHz)대역의 주파수를 활용하여 조종신호 및 영상 데이터를 송·수신한다. 현재 433MHz는 면허대역이지만 정부가 빠르게 성장하는 드론산업 지원을 위해 433MHz 대역을 비면허 주파수로 변경하려는 검토가 이루어지고 있어 드론 운용에 유망한 주파수 대역대로 주목받고 있다. 이러한 ISM 밴드 대역은 비면허 대역으로써 무선국 허가 없이 자유롭게 사용할 수 있지만,

전파간섭과 감쇠로 인한 문제점도 증가한다. 특히 실제 소방현장은 화재에 의한 농연 또는 붕괴된 건축물 협소 공간의 벽체로 인해 비행환경이 악조건이며, 전파 감쇠 현상이 빈번할 수 있다. 전파 특성상 일반 공기 중에 무손실로 통과하는 전파에 비해 유전체나 농연 등과 같은 입자가 존재하는 공기층을 통과할 때 대기 손실과 유전층에서 발생하는 분극현상에 의한 손실이 발생한다. 건축물 벽체에 의해 발생하는 반사손실에 대한 실험적 연구가 보고되었다[1-3]. 또한 화재 시 화염에서 발생하는 전자기파 특성에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 산림속에서 전자파의 흡수 및 위상변화에 대한 연구가 네트워크 분석기를 활용하여 분석 및 측정되었고, 산불 환경에서의 열이온화에 대한 연구가 제시되었다[4-6]. 그러나 네트워크 분석에 따른 반사 손실과 화염에서의 특성 분석에 국한되었다. 그리고 화염의 크기와 직경에 따른 전파 감쇠 특성을 시간 경과에 따라 비교 분석하였다[7]. 벽체 또는 동일한 농도의 연기상황에 따라 드론을 활용하여 전파 특성을 비교 분석하는 연구는 없으나 유사 연구로 신호발생기와 네트워크분석기를 활용하여 주파수별 투과 손실을 비교하였다.

Table 1은 벽체 투과 및 농연에 따른 기존 연구의 기술을 비교하였다.

본 연구는 범용으로 개발되는 오픈소스 FCC(Flight Control Computer)를 기반으로 드론을 제작하고, 드론 운용에 필요한 3가지 주파수(433MHz, 2.4GHz, 5.8GHz)의 통신 모듈을 구성하였다. 이를 활용하여 실제 소방현장에서 빈번하게 발생하는 전파 감쇠 요소 중 벽체 또는 농연의 종류에 따른 드론에서 송·수신되는 전력을 측정하고, 드론

Table 1. Comparison of research according to wall and smoke

No	Title	Attenuation	Frequency	measurement
1	Different kinds of walls and their effect on the attenuation of radio waves indoors[1]	wall	433MHz, 868MHz 2.4GHz, 5.0GHz	simulation
2	Propagation losses through common building materials 2.4 GHz vs 5 GHz[2]	wall	2.4GHz, 5GHz	Transmission and Reflection coefficient
3	Transmission Characteristics Measurement of Building Materials[3]	wall	1 ~ 8GHz	Transmission coefficient
4	Microwave attenuation in forest fuel flames[5]	flame	9.8 ~ 12.5GHz	relative attenuation with network analyzer phase shift
5	Radio experiments with fire[7]	flame	160 ~ 180MHz 400 ~ 450MHz 850 ~ 900MHz	relative attenuation with signal generator
6	Measurements on the Effects of Moisture on the Complex Permittivity of High Temperature Ash[6]	Ash	8 ~ 12GHz	relative permittivity

운용에 영향을 주고 있음을 확인하기 위해 전파 감쇠를 정량적으로 측정하고자 한다. 본론 2.1에서는 건물 내·외부에서의 드론 운용에 한계점을 실험을 통해 제시하였으며, 2.2에서는 본 연구에 적용된 실험용 드론 시스템 구성, 벽체와 농연에 따른 실험을 위한 시나리오와 실험설정을 논의하였다. 또한 본론 3.1은 벽체 종류에 따른 전파 감쇠 결과를 3.2는 연기 종류에 따른 측정 결과를 보여주었다.

## 2. 본론

### 2.1 사전 드론 운용실험

도심지 화재·구조현장에서 드론은 공중에서 촬영한 영상을 현장과 상황실에 공유하여 상황파악 오류를 최소화시키고, 효율적으로 현장을 관리하는 데 일조한다. 대부분 전문 촬영용으로 출시된 상용 드론의 통신 기술 수준은 2.4GHz / 5.8GHz 주파수로 Dual Band 형태로 호환 가능하게 설계되었고, 특히 전문 촬영용 드론 제조사인 DJI社에서는 LightBridge [8], OcuSync [9,10] 등 독자적인 통신 프로토콜 설계를 통해 영상 압축, 주파수 자동 증폭, 지연 최소화 등 기능 구현으로 드론 운용자는 아날로그 통신 방식에 비해 우수한 전송 기술을 체감할 수 있다[11]. 그러나, 우수한 기술임에도 불구하고 실제 빌딩 화재현장에서 드론 운용 시 영상이 끊기는 등 비가시권 드론 운용에 한계가 있었다. 이러한 현상을 구체적으로 확인하기 위해 상용드론 운용 시 전파가 감쇠되어 운용에 지장이 있는지 현장활동을 통해 확인하였다.



Fig. 1. Operation of drones inside buildings  
(a) Fire training ground (b) Drone crash



Fig. 2. Video signal attenuation when operating a building drone

#### 2.1.1 건물 내부 운용

실내 드론 수색은 비가시권 비행이다. 비가시권 비행은 조종자가 드론을 볼 수 없는 상황에서 드론에 장착된 카메라를 통해 실내 구조와 장애물 위치를 파악해야 된다. Fig. 1(a)는 피난훈련용 실화재 훈련장[9]의 장소를 활용하여 외부에서 내부로 투입하는 시나리오다. 조종자는 모니터에 의존하여 실내에서 드론 운용을 실시하였다. 기체가 건물 내부로 진입하여 아래층으로 이어진 계단부로 이동하는 순간부터 영상 송·수신 지연현상이 발생되었다. 이에 따라 모니터에 의존하는 조종자는 조종시 대처 불가로 인해 드론이 Fig. 1(b)처럼 벽에 부딪혀 추락되었다. 훈련장의 건축물은 철근콘크리트 구조와 내장재 등으로 설계된 환경이다. Fig. 2에서처럼 HD이상급 영상 송·수신을 요구하는 상용드론은 두꺼운 콘크리트 벽체 및 바닥재와 내장재 등에 의해 통신이 감쇠되어 장애물을 통과하지 못하고 조종자의 모니터 영상이 끊기는 현상이 발생한다.

#### 2.1.2 건물 외부 운용

외부 드론 운용 시 화점탐색 등 건축물 외부상황에 대한 지휘 정보를 제공하기 위해 고층빌딩의 벽체를 넘어 비가시권 비행으로 증계한다. 이 경우에도 그림2와 같이 수신되는 영상신호가 크게 감쇠되고 있음을 알 수 있다.

### 2.2 실험 시나리오 및 설정

#### 2.2.1 실험용 드론 시스템 구성

본 실험에서는 범용으로 사용되는 FCC(Flight Control Computer)개념인 Pixhawk[12] 기반으로 비행체를 제작하였다. Pixhawk는 오픈 소스(Open Source) 플랫폼이며, 일부 변형·개조하는데 있어 개발 진입장벽이 낮다. 이로 인해 최근 대다수 국내업체에서 공공의 목적으로 개발되는 드론은 Pixhawk 기반으로 연구하고 있다. 본 논문에서는 현장에서 운용되는 국내산 드론의 기술과 동일한 Pixhawk 기반 드론 시스템을 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 제작하였다. Pixhawk 시스템에 포함되는 통신모듈은 Table 2과 같이 3가지로 구성이 된다. 첫 번째로, 텔레메트리(Telemetry)모듈은 지상관제시스템(Ground Control System)과 통신에 사용되는 주요 수단이며, 기체의 비행경로와 정보를 실시간으로 파악가능하고, 수행중이던 임무를 변경할 수도 있다. 본 연구에서는 드론의 장거리 운용에 유리한 저주파수 대역인 유럽용 433MHz 주파수 대역의 텔레메트리 모듈을 설계하였다. 두 번째로,

Table 2. Drone Communication Module

model	Telemetry (433MHz)	X8R (2.4GHz)	TS832 (5.8GHz)
brand	Holybro	Frsky	Eachine
Photo			
Specification	Size: 28x53x10.7mm Dehumidifier: 5V Frequency: 433 MHz (FHSS) Operation: 25mA Maximum runtime: 100mW protocol: MAVLink Firmware: Open-source SIK	Size: 47x24x15mm Weight: 16.8g Voltage range: 4-10.0V Frequency: 2.4GHz Operating current: 100mA @ 5V Operating Range: >1.5km (Full Range) RSSI output: analog voltage output (0~3.3V)	Size: 54x32x10mm Weight: 22g Channel: 40CH Voltage range: 7-16V Frequency: 5.8GHz Transmission power: 600mA Video Format: NTSC / PAL Auto
Purpose	Ground control, Autopilot	Drone control	Video transmission

2.4GHz 주파수 대역의 조종수신기는 대중적으로 사용하는 있는 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation) 프로토콜 방식을 사용하고 있으며, 조종기에서 보낸 제어신호를 수신기에서 받아 최종적으로 Pixhawk에서 처리된다. Pixhawk 시스템은 기본적으로 자동비행(AutoPilot) 개념이며, 433MHz 주파수의 텔레메트리 모듈만으로 운용이 가능하지만 2.4GHz의 조종수신기는 기체 오작동에 대한 비상대처에 대비하여 수동 조종을 목적으로 필수적으로 구성해야 한다. 세 번째로, 5.8GHz 주파수 대역대의 영상 송신기는 2.4GHz에 비해 간섭이 비교적 적으며, 이에 따라 통신 지연시간이 적기 때문에 운용자가 영상에 의존하여 조종하는 방식인 FPV(First Person View) 드론 운용에 적합하다[13].

433MHz 텔레메트리와 2.4GHz의 조종수신기의 제어신호는 Pixhawk 시스템에서 처리되기 때문에 Fig. 4와 같이 Pixhawk에서 할당된 포트에 연결하여 전력공급을 받았으며, 5.8GHz의 영상송신기는 기체 메인프레임 배전반에서 별도 전원 배선을 추가하여 CCD카메라와 연결하였고, 40개 채널 중 1개 채널(5.8654GHz)을 선정하여 일관된 주파수대역으로 측정하였다.



Fig. 3. Drones built with the Pixhawk system

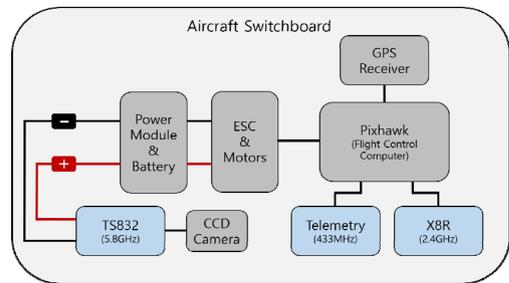


Fig. 4. Pixhawk Drone System Connection Diagram

### 2.2.2 건축물 자재

Fig. 5(a)는 건축자재의 종류와 두께에 따른 전파 감쇠 측정을 위한 시나리오와 실험설정을 보여준다. Fig. 5(a) 처럼 완전 차폐 공간의 크기는 3m x 1m x 1m이다. 실험에 사용되는 벽체 크기는 챔버의 크기와 동일한 1m x 1m x 0.2m(W)이다. 송·수신 거리는 3m이며 0.2m 두께 벽체는 챔버 중앙에 배치되었다. 본 연구에서 사용된 벽체는 건물내부에 많이 사용되고 있는 콘크리트, 타일 벽돌, 벽돌 벽, 블록으로 선정하였고, 두께에 따른 통신 성능을 비교하기 위해 콘크리트의 경우 0.15m(W) 두께로 비교 실험을 하였다.

Fig. 5(b)는 벽체 종류 및 두께 따른 통신 성능 측정 사진을 보여준다. 송신기에는 드론에 장착된 픽스호크 기반의 영상송신기(TS832), 조종 수신기(X8R), 임무용 조종 수신기(Holybro) 모듈을 수신부에는 무전기로부터 전송되는 신호를 수신하기 위해 혼 안테나(RT-RF)를 배치하였다. 영상 송신기는 48채널 중 5.865MHz 동작하는 채널을 설정하였으며 600mW(27.8dBm)의 송신 출력

을 보여준다. 조종 수신기는 2.4GHz 대역을 이용하고 있으며 주파수 도약 대역 확산(Frequency Hopping Spread Spectrum : FHSS)방식이 적용되어 정해진 시간에 따라 다수의 독립 채널을 바꿔가며 통신한다. 송신 출력은 500mW(27dBm)이다. 또한 주파수 특성상 장거리 통신이 가능한 임무용 조정 수신기는 433MHz 대역을 적용하였으며 송신되는 출력은 500mW(27.8dBm)이다. 수신부 혼 안테나(RT-RF)는 433MHz 대역에서 0dBi, 2.4GHz 대역에서 8dBi 이고 5865MHz 대역에서 11dBi를 각각 보여준다. 건축물 벽체에 의한 수신 전력을 측정하기 위해 Key sight 스펙트럼 분석기(N9344C)를 사용하였으며, 손실이 적은 RF 동축 케이블을 챔버 외부에 있는 스펙트럼 분석기와 연결하여 수신감도를 측정하였다.

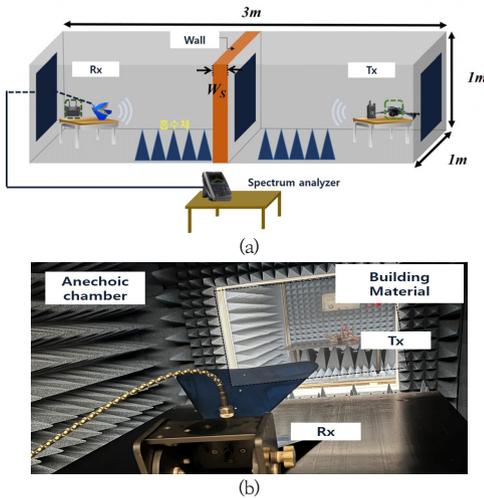


Fig. 5. The experimental set up for microwave attenuation measurement by the type and thickness of the building material  
(a) structure of measurement set up  
(b) photograph of measurement set up

### 2.2.3 농연

Fig. 6(a)는 연료에서 생성되는 연기에 의한 전파 감쇠를 측정하는 시나리오 및 실험 구성을 보여준다. 실 화재 조건을 구성하기 위해 사무 공간과 유사한 컨테이너 박스에서 실험하였으며 컨테이너 공간은 그림 6(a)와 같이 5.8m x 2.8m x 2.2m이다. 연료를 연소시키는 상자 크기는 0.5m x 0.5m x 0.5m이며 컨테이너 중앙에 배치되어 실험에 사용된 연료에서 연기만을 방출한다. 본 연구에서는 화재 시 연소물질로 널리 사용되고 있는 목재, 고무, 플라스틱, 우레탄을 연료로 사용하였다. 송·수

신부는 벽체실험과 같은 방식으로 구성하였으며, 송신과 수신 사이의 거리는 5m이다. 연기는 연소 중에 가열되고 가열된 열기에 의해 부력이 발생한다. 그 결과 일반적으로 연기가 위층으로 올라가 벽을 따라 이동한다.

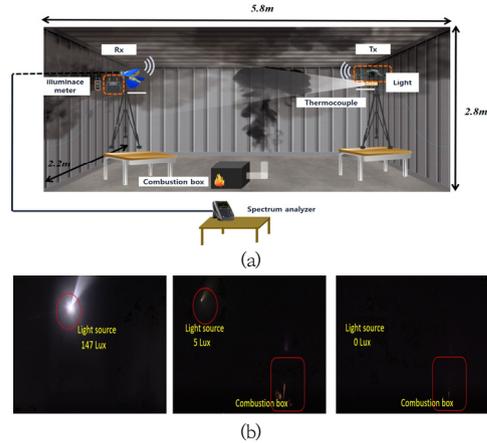


Fig. 6. The experimental set up for microwave attenuation measurement by smoke according to fuel  
(a) structure of measurement set up (b) photograph of the illuminance that decreases according to smoke by urethane

상층부에서 발생한 연기층에서 발생하는 전파 감쇠를 측정하기 위해 송·수신 측정 시스템은 Fig. 6(a)와 같이 컨테이너 상부 위치에 설치되었다. Fig. 6(b)는 컨테이너 공간에서 우레탄 연기증가에 따라 감소되는 조도값을 보여준다. 그림에서처럼 연기가 증가함에 따라 투과되는 빛이 감소하여 조도값이 0이 되고 있음을 알 수 있다. 연기 밀도는 일반적으로 ASTM 662 표준[14]과 같은 광소멸 방법을 이용하며 빛이 연기를 투과하는 양(투과율)을 분석하여 연기 밀도를 측정한다.

본 논문에서는 컨테이너 공간에 연기량을 동일하게 구성하기 위해 광소멸법을 응용하였다. 1,800 루멘(lumen)의 광원(Night watch ST6)과 디지털 조도계(CA-2500, konika minolta)를 이용하여 광원에서 빛이 방출되고 조도계를 통해 수신된 조도값이 0이 될 때까지 연기를 발생시켰다. 이를 통해 컨테이너 내 송·수신 공간은 연료에 따른 동일한 연기량을 구성하였다. 연료별로 동일한 연기밀도를 구성한 후 송·수신 사이의 전파 특성을 측정하였다. 또한 송신부와 수신부에 각각 열전대를 설치하여 연기층의 온도를 분석하였다.

## 2.3 측정 결과

### 2.3.1 벽체

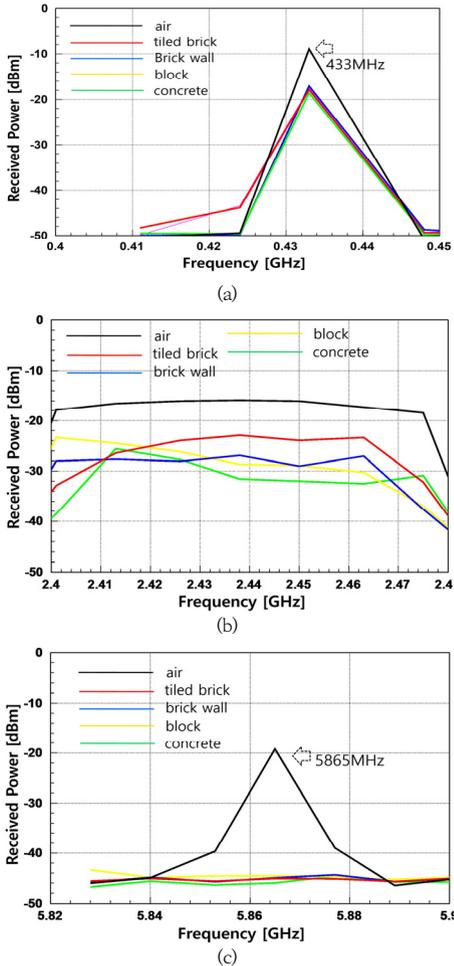


Fig. 7. Measurement result of the received power according to the building material  
(a) 433MHz (b) 2.4GHz (c) 5.865MHz

Fig. 7(a)는 벽체 종류에 따른 드론의 수신 전력을 보여준다. 계산된 수신 전력과 측정된 수신 전력을 비교하기 위해, 다음의 방정식 (1)에서처럼 프리스(friis)의 공식을 사용했다. 이를 통해 손실 없는 이상적인 조건에서 수신 전력을 이론적으로 계산할 수 있다.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

where,  $P_r$  denotes receiving power,  $P_t$  denotes transmitting power,  $G_t$  denotes transmitting gain,  $G_r$  denotes receiving gain,  $\lambda$  denotes wavelength,

$R$  denotes distance between  $R_x$  and  $T_x$

$P_r$ 은 수신 안테나( $R_x$ )에서 수신되는 전력,  $P_t$ 는 송신( $T_x$ ) 안테나에서 전송되는 전력,  $G_t$  및  $G_r$ 은 각각 송수신 안테나 이득,  $\lambda$ 는 파장, 그리고  $R$ 은  $R_x$ 와  $T_x$  안테나 사이 거리이다. 이때, 3m 거리에서 프리스 공식을 이용하여 계산된 수신 전력은 433MHz 대역에서 -8.53dBm, 2.4GHz에서는 -15.4dBm 그리고 5.865GHz에서는 -18.66dBm이다. 무반사실에서 벽체 없는 자유공간에서 측정된 최대 수신 전력은 433MHz 대역에서 -8.97dBm이고, 2.4GHz ~ 2.48GHz 대역까지 다수 채널간 수신되는 최대수신전력은 -15.88dBm이다. 그리고 5.865GHz 대역에서 수신되는 최대 수신 전력은 -19.23dBm 이다. 계산된 수신전력과 측정된 수신전력은 거의 유사하다. 본 논문에서는 Fig. 7에서처럼 완전 차폐 공간에서 벽체가 있는 경우와 없는 경우의 드론의 수신성능을 비교 분석하였다. Table 3와 Fig. 7은 200mm 두께의 벽체 종류에 따른 드론의 수신 전력을 주파수 별로 분석하였다. Table 3와 Fig. 7에서처럼 벽체에 따른 수신 전력이 자유공간에 비해 약 10dBm 이상 크게 감소하였으며, 특히 임무용 조종 수신기(433MHz)에 비해 조종 수신기(2.4GHz)와 영상수신기(5.865GHz)의 경우 감소폭이 크며, 특히 높은 주파수인 5.865GHz대역에서는

Table 3. Measurement result of the received power according to the building material in terms of frequency

Frequency	concrete	tiled brick	brick wall	block
433MHz	-18.60dBm	-17.88dBm	-17.10dBm	-17.54dBm
2.4GHz	-25.58dBm	-22.90dBm	-26.14dBm	-23.13dBm
5.865GHz	-45.96dBm	-45.1dBm	-44.97dBm	-44.54dBm

Table 4. Measurement result of the received power according to the concrete width in terms of frequency

concrete width	433MHz	2.4GHz	5.865GHz
200mm	-18.60dBm	-25.58dBm	-45.96dBm
150mm	-15.15dBm	-22.53dBm	-45.62dBm

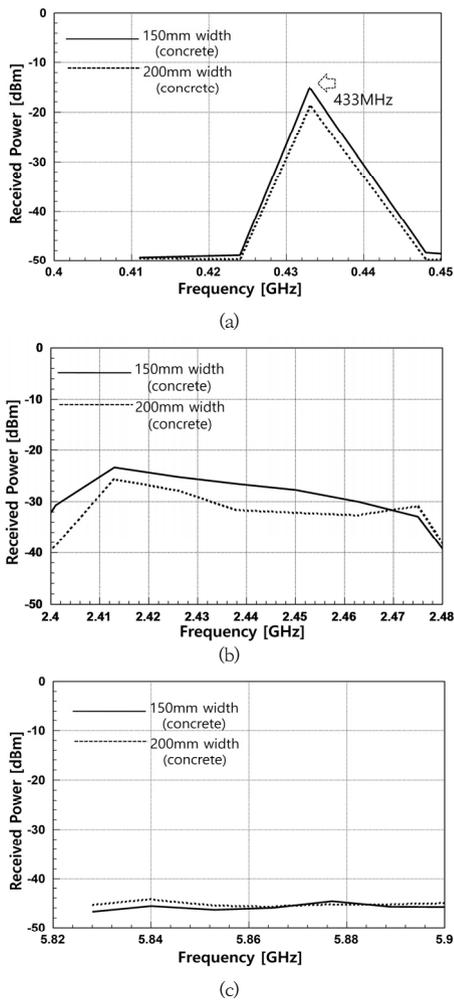


Fig. 8. Measurement result of the received power according to the concrete width (a) 433MHz (b) 2.4GHz (c) 5.865GHz

거의 수신이 되지 못하였다. 또한 벽체 종류에 따라 수신 전력이 다소간의 차이가 발생하였으며 433MHz 대역에서는 최대 1.5dBm, 2.4GHz 대역에서는 3.24dBm, 5GHz 대역에서는 1.42dBm이다. Table 4와 Fig. 8은 벽체 두께에 따른 전파 감쇠에 대한 특성을 보여준다. Table 4과 Fig. 8에서처럼 콘크리트 200mm와 150mm 두께에 대한 전파특성을 비교했을 때 433MHz와 2.4GHz 대역에서 3dBm가량 수신 전력 차이가 발생하였다. 5.865GHz 대역은 벽체에 따른 감쇠가 크게 나타나 거의 수신에 이루어지지 못하여 두께별 전파 감쇠의 차이가 발생하지 않았다.

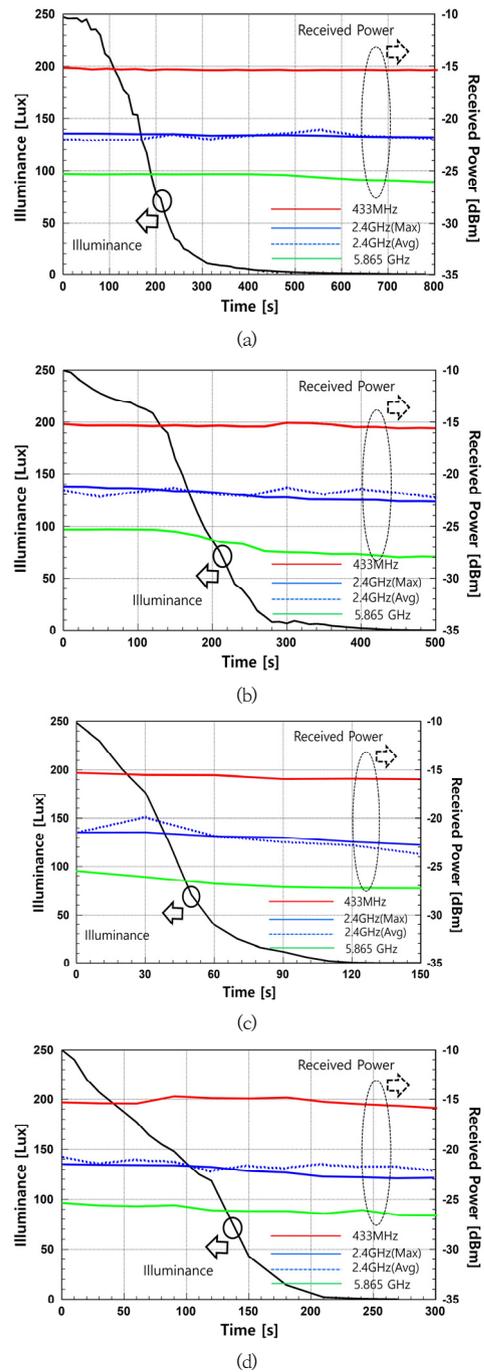


Fig. 9. Measurement result of the received power and illuminance according to the type of smoke (a) wood (b) plastic (c) urethane (d) rubber

### 2.3.2 연기 종류

Fig. 9(a), (b), (c) 및 (d)는 4종류의 연료연소시 발생

하는 연기에 따른 조도와 드론의 수신 전력을 보여준다. 실험에 사용된 4종류 연료는 실제 화재 현장에서 발생하는 대표적인 연료로 목재, 고무, 플라스틱, 그리고 우레탄이다. 일반적으로 연기층에는 열분해되지 못한 일부의 연소 물질과 입자들이 존재하며, 목재와 같이 충분히 산소와 반응하는 완전연소의 경우 상대적으로 높은 이산화탄소 농도를 갖고 불완전 연소시 일산화 탄소의 농도가 상대적으로 높다. 또한 연료에 의해 발생하는 연기층에는 이산화질소와 시안화수소와 같은 많은 유독가스를 가지고 있으며 고무에는 이산화황(So<sub>2</sub>)이, 우레탄에는 시안화수소(HCN)가, 플라스틱에는 이산화질소(NO<sub>2</sub>)와 염화수소(HCL)가 주로 함유되어 있다. 본 논문에서는 연기에 따른 전파 감쇠에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 수신감도 측정 시 컨테이너 내 연기의 양은 각각 동일하게 구성하였다. 이론적으로 계산된 수신 전력과 자유공간에서 측정된 수신 전력을 비교하기 위해 Eq. (1)에서와 같이 프리스 공식을 사용했다. 5.6m 거리에서 계산된 수신전력은 433MHz에서 -15.41dBm 이고, 2.4GHz 대역에서 -20.80dBm 그리고 5.865GHz 대역에서 -24.09dBm 이다. 자유공간에서 연기발생없이 측정된 수신 전력은 433MHz에서 목재의 경우 -15.23dBm, 2.4GHz 대역에서 -21.40dBm, 5.865GHz 에서 -25.26dBm 이다. 계산된 수신전력과 거의 유사하다. 시험 조건을 동일하게 구성하였으며 자유공간에서 초기 수신전력과 조도값은 연료별로 거의 동등하게 측정되었다. 수신전력을 30초 간격으로 3회 측정하여 평균값으로 하였다. 또한 광원으로부터의 조도는 10초 간격으로 측정하였고, Tx 및 Rx 위치에 연기층 온도는 열전대를 이용하여 30초 간격으로 측정하였다. Fig. 9(a)는 목재를 연소시켰을 때 시간에 따른 조도의 감소량과 주파수별 수신되는 전력을 보여준다. Fig. 9(b)는 플라스틱, Fig. 9(c)는 우레탄 그리고 Fig. 9(d)는 고무를 연소시켰을 때 감소되는 조도와 수신 전력을 보여준다.

Table 5. Measurement result of the received power according to smoke type when full of smoke layer

Frequency	wood	plastic	urethane	rubber
433MHz	-15.47dBm	-15.65dBm	-15.88dBm	-15.83dBm
2.4GHz	-22.15dBm	-22.65dBm	-22.94dBm	-22.59dBm
5.865GHz	-26.12dBm	-27.67dBm	-27.15dBm	-26.50dBm

Table 6. Time taken to fill container with smoke layer

wood (time)	plastic (time)	urethane (time)	rubber (time)
13'30"	8'30"	3'	5'

Table 7. Summary of the temperature of the smoke layer in Tx and Rx part.

Frequency	wood (°C)	plastic (°C)	urethane (°C)	rubber (°C)
Tx (initial)	17.4	17.9	19.9	20
Rx (initial)	17.2	18.6	20.3	20.7
Tx (final)	38.8	43	43.5	44.4
Rx (final)	41.5	44.7	41.4	41.6

Table 5는 연료에 따라 수신되는 전력을 영상송신기(5.865GHz), 조종 수신기(2.4GHz), 임무용 조종 수신기(433MHz) 별로 나타내었다. 또한 Table 6는 연료별로 연소시 연기발생에 의해 조도가 0이 될 때 소요되는 시간을 보여준다. Fig. 9와 Table 5에서와 같이 자유공간에 비해서 수신전력 차이가 433MHz 대역에서는 최대 0.65dBm(우레탄), 2.4GHz대역에서는 최대 1.54dBm(우레탄), 그리고 5.865GHz 대역에서는 2.41dBm(플라스틱)이다. 또한 연료별로 나타나는 수신전력은 433MHz 대역에서는 최대 0.41dBm, 2.4GHz 대역에서는 0.79dBm, 5GHz 대역에서는 1.17dBm이다. 자유공간에서의 수신전력과 비교해서 전파 감쇠는 크지 않으며 주파수 별로 사용되는 연료에 따라서도 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 우레탄, 플라스틱, 고무의 경우 목재의 비해 전파가 상대적으로 더 크게 감소하였으며 연소 중 유독가스와 불완전 연소로 인한 그늘음이 목재 대비 전파 감쇠에 영향을 미친다고 할 수 있다.

또한 상대적으로 파장이 짧은 2.4GHz 대역과 5GHz 대역에서도 433MHz 대역보다 감소폭이 크다. Table 5에서처럼 우레탄의 경우 연소 시 발생하는 연기에 의해 컨테이너 공간은 3분만에 248럭스(lux)에서 0럭스(lux)로 감소해 가장 빠르게 연기가 채워졌으며 목재의 경우는 연소되는 시간이 가장 많이 소요 되었다. Table 7은 Tx 및 Rx 부분의 연기층의 온도를 나타낸다. Table 7에서 보는바와 같이, 20°C에서 45°C로 시간이 지남에 따라 증가하였다. 연소 시 발생하는 연기층을 구성하는 시간은 연료에 따라 다르지만, 연기층의 온도는 거의 동일하다.

### 3. 결론

본 논문에서는 재난 환경에서 연기 및 벽체 종류 따른 전파 감쇠를 분석하였다. 건물 내 건축재료에 의한 전파 감소를 분석하기 위해 완전 차폐된 무반사실을 구축하였으며, 4종류의 벽체를 이용하여 실험적 연구를 수행하였다. 측정된 벽체의 종류와 두께에 따른 수신전력은 자유 공간보다 크며 10dBm 가까이 감소하였다. 본 논문의 실험을 통해 드론 운용시 사용하는 433MHz 대역의 투과특성과 장거리 통신 특징을 분석하고 이를 통해 주파수 사용에 대한 필요성과 국내 무선설비 기준 마련에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 연기층 내 전파의 투과특성 분석을 위해 4종류 연료를 사용하여 실험을 수행하였고, 컨테이너 내 연기층은 광소멸법을 이용하여 동일하게 구성하였다. 연료의 종류에 따른 수신전력은 큰 차이는 없으나 우레탄은 다른 연료에 비해 수신전력 감소가 상대적으로 크고 연소속도가 빠르다. 본 논문에서는 실제 소방 현장에서 활용되는 드론 시스템을 이용하여 전파 통신 성능을 분석하였다. 본 연구를 통해 소방대원의 현장활동시 실내외 탐색과 고층건물 운용시 대응 매뉴얼 개발 그리고 농연 또는 벽체에 의한 음영지역에서 회피하는 운용방안에 대한 연구에 도움이 될 것으로 기대된다. 향후 실제 건물 내부 구조에 따른 통신 성능 검증과 소방현장의 드론 한계점을 파악하고 개발단계부터 현장 요구 사항을 고려한 현장적용형 기술 개발에 기여하며 안정성이 확보된 제품을 도입하기 위한 실험방법 및 성능평가 기준을 마련할 예정이다.

### References

[1] P. Ali Rantala, L. Ukkonen, L. Sydanheimo, M. Keskilampi, M. Kivikoski, "Different kinds of walls and their effect on the attenuation of radiowaves indoors", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 3, pp. 1020-1023, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2003.1220085>

[2] L. T. Common, "Propagation losses through common building materials 2.4 GHz vs 5 GHz", *E10589, Magis Network, Inc*, 2002.

[3] S.S.Cho, I.P.Hong, "Transmission Characteristics Measurement of Building Materials", *Proceedings of the Korean Institute of Communication Sciences Conference*, pp. 816-817, 2007.

[4] J. Schneider, F. W. Hofmann, "Absorption and dispersion of microwaves in flames." *Physical Review*,

Vol 116, No 2, pp. 244, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.116.244>

[5] K. M. Mphale, P. V. C. Luhanga, M. L. Heron, "Microwave attenuation in forest fuel flames", *Combustion and flame*, Vol 54, No 4, pp. 728-739, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.07.006>

[6] T.C.Baun, K.Ghorbani, "Measurements on the Effects of Moisture on the Complex Permittivity of High Temperature Ash", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 64, pp. 604-615, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2512595>

[7] J. Boan, "Radio experiments with fire", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol 6, pp. 411-414, Sep. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.902809>

[8] DJI official website, DJI LIGHTBRIGHT(english) spec, <https://www.dji.com/kr/dji-lightbridge> (accessed Oct. 24, 2022)

[9] J. K. Lee, DRONE people, "DJI OcuSync", 2017. 4. 5., <https://m.blog.naver.com/lovejuuu/220975658391> (accessed Oct. 24, 2022)

[10] C.H.Han, "Technology Trend Analysis on the DJI's Commercial Drones in China", *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol.17, No.1, pp. 21-31, 2019.

[11] H. Y. Kim, "Development of a fire training facility for evacuation drills in according with the smoke movement and controlled environment", *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT)*, Korea, 2019. DOI: <https://doi.org/10.23000/TRKO201900014296>

[12] PX4 official website, PX4 Autopilot User Manual, [https://docs.px4.io/main/ko/getting\\_started/px4\\_basics\\_concepts.html](https://docs.px4.io/main/ko/getting_started/px4_basics_concepts.html) (accessed Oct. 24, 2022)

[13] I. K. Cho, I. K. Lee, "A Study on Improvement of Technical Regulation for Drone Racing System Operating in the 5.8-GHz Band", *The Journal of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 31, No.7, pp. 577-583, Jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.7.577>

[14] *Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials*, ASTM International, 2021.

김 태 동(Tae-Dong Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경일대학교 금융증권학과 (학사)
- 2022년 2월 : 한서대학교 항공시스템 공학 (석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 국립소방연구원 연구원

<관심분야>

소방장비, 항공시스템, 드론, 정보통신

---

염 인 수(In-Su Yeom)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서울과학기술대학교 나노·IT 융합공학 (공학석사)
- 2017년 2월 : 서울과학기술대학교 나노·IT 융합공학 (공학박사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 국립소방연구원 연구원

<관심분야>

안테나 공학, 전파공학, 무전기, 소방정보통신